

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. ФУРСАНОВ М. И.

Белорусский национальный технический университет

В статье представлены основные результаты научных исследований, выполняемых на кафедре «Электрические системы» и в научно-исследовательской лаборатории «Производство и распределение энергии» энергетического факультета БНТУ по проблеме потерь электроэнергии в сетях энергосистем.

С учетом ограниченности топливно-энергетических ресурсов Земли данная проблема приобрела первостепенное значение практически для всех государств. Не случайно во многих странах мира (США, Франция, Великобритания, Япония, Германия, Россия, Беларусь) на государственном уровне созданы специальные органы по рациональному использованию природных ресурсов, разработаны национальные программы. Важное место в общей проблеме энергосбережения отводится потерям электрической энергии в сетях энергосистем (ЭС). Величина фактических потерь может достигать 20 % и более, поэтому прежде всего особое значение имеет объективная оценка потерь как одного из показателей эффективности работы электрических сетей. Кроме того, стоимость потерь входит в общепринятый экономический критерий – приведенные затраты, поэтому достоверность ее оценки в конечном итоге влияет на обоснованность принимаемых решений в задачах технико-экономического анализа.

Общие принципы выполнения расчетов, анализа и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях формулируются в соответствующих документах, в которых находит отражение многолетний опыт работы в данной области различных учебных, научно-исследова-

тельских, проектных и эксплуатационных организаций. Вопросы потерь постоянно обсуждаются на международных и республиканских конференциях, совещаниях и семинарах. За последние 10...12 лет условия функционирования электрических сетей качественно изменились. Во многих случаях спад производства привел к недогрузке сетей и их элементов, ощущается постоянный дефицит материальных ресурсов, имеют место оснащение сетей современными электронными приборами и системами учета электроэнергии, повсеместная телемеханизация и компьютеризация сетей.

Отмеченные обстоятельства требуют разработки более эффективного методического и программного обеспечения, способного оперативно адаптироваться к динамическим условиям эксплуатации, учитывать «наблюдаемость» части сети, неизбежные информационные погрешности данных, доказывать и обосновывать корректность получаемых результатов путем расчета и анализа погрешностей и доверительных интервалов потерь.

Основная цель исследований состоит в разработке алгоритмизированной методологии определения, анализа и оптимизации уровней потерь электрической энергии при ее транспорте по сетям энергосистем, обеспечивающей эффективное развитие и управление режимами сетей с целью снижения стоимости транспорта электроэнергии и включает в себя разработку и реализацию:

- методологии определения и анализа величины, структуры, погрешностей и доверитель-

ных интервалов потерь электроэнергии в электрических сетях ЭС с учетом реальных возможностей получения топологических и режимных данных;

- методологии определения и анализа оптимальных уровней потерь электроэнергии в электрических сетях ЭС;

- концептуальных основ принятия решений в условиях многовариантности, позволяющих осуществлять движение в сторону оптимального состояния электрических сетей по критерию минимума стоимости передачи электроэнергии и, как следствие, к оптимальной величине потерь;

- программного обеспечения по расчету и анализу режимов и потерь электроэнергии.

Результаты исследований представлены в порядке их глубины и ретроспективы использования в энергосистемах, а именно: распределительные электрические сети 6–20 кВ, электрические сети до 1000 В, сети 35 кВ и выше, оптимальные уровни потерь в сетях и их достижение и программное обеспечение расчетов.

Итак, распределительные электрические сети 6–20 кВ. На основе базовых положений по расчету потерь разработана алгоритмизированная методология для определения величины, структуры, погрешностей, недопустимых небалансов потоков и доверительных интервалов потерь электроэнергии в электрических сетях 6–20 кВ произвольного объема, учитывающая особенности существующей и перспективной информационной обеспеченности данных сетей и базирующаяся на эквивалентировании сетей по критерию равенства потерь в исходных и эквивалентных схемах, на основе уравнений множественной регрессии и метода статистических испытаний. В условиях дефицита режимной информации приходится использовать эквивалентирование сетей и определять индивидуальные r_3 (по каждой распределительной линии) и обобщенные R_3 (по произвольной совокупности сетей) эквивалентные сопротивления линий и трансформаторов. При наличии информации о нагрузках распределительных трансформаторов (РТ) эквивалентные сопротивления определяются по реальным коэффи-

циентам загрузки РТ, а при их отсутствии принимается допущение о распределении нагрузки головных участков распределительных линий пропорционально, например, номинальным мощностям установленных трансформаторов. Формулы для определения r_3 и R_3 в этом случае значительно упрощаются – из них исчезают коэффициенты загрузки РТ, что позволяет выполнять расчеты только с использованием топологических данных о схемах электрических сетей. Отличительной особенностью статистических математических моделей эквивалентных сопротивлений является использование в качестве результативного признака не самого эквивалентного сопротивления, как это принято традиционно, а числителя формулы, по которой оно определяется, что приводит к значительному повышению точности регрессионных моделей. При использовании метода статистических испытаний (Монте-Карло) дополнительно исследованы и предложены пути по уменьшению необходимого для расчетов объема схем выборки. С целью количественной оценки информационных и методических погрешностей получены соответствующие аналитические соотношения для расчета и анализа погрешностей определения потерь в функции основных влияющих факторов в условиях различной информационной обеспеченности электрических сетей.

На основе теоретических проработок исследованы погрешности расчета индивидуальных эквивалентных сопротивлений электрических сетей 6–20 кВ в условиях эксплуатации.

Получены и апробированы аналитические соотношения для оценки погрешностей обобщенных эквивалентных сопротивлений в функции числа эквивалентизируемых линий. С использованием относительных приростов потерь в сетях исследовано влияние нагрузки и места ее подключения на величину потерь и показано, что основным влияющим фактором здесь является удаленность нагрузки от центров питания. По мере увеличения объемов обрабатываемых режимных данных будет происходить постепенный переход от эквивалентных расчетов к поэлементным. С учетом данного обстоятельства была разработана алгоритмизированная методика для выполнения поэлементных

расчетов и анализа режимов и потерь электроэнергии в распределительных сетях 6–20 кВ на основе детализированной сетевой и режимной информации.

Наряду с исследованиями в области определения и анализа потерь электроэнергии в распределительных сетях 6–20 кВ разработана и компьютерно реализована серия алгоритмов для расчета и оптимизации городских электрических сетей данного класса номинального напряжения. Алгоритмы позволяют решать следующие основные задачи городских сетей: расчет и анализ режимов электрических сетей; оптимизация точек разрезов; расчет емкостных и зарядных токов; оценка чувствительности максимальных токовых защит; построение эквитоковых кривых с целью отыскания места замыкания на землю по показаниям фиксирующих приборов и ряд других.

Для электрических сетей до 1000 В в условиях неполноты схемной и особенно режимной информации разработана методика оценки потерь по обобщенным данным и на основе схем выборки.

Второе направление (поэлементные расчеты потерь) позволяет проводить поэлементный анализ режимов и потерь в электрических сетях до 1000 В на основе детерминированных исходных данных, когда в качестве исходной информации используются топологические данные о схемах распределительных линий и режимные данные по их головным участкам, а в предельном случае – нагрузки отдельных фаз сети. С учетом специфических топологических и режимных особенностей разомкнутых электрических сетей 35 кВ и выше разработаны и реализованы универсальный алгоритм для расчета и анализа режимов и собственная идеология оценки потерь электроэнергии, ориентированная на эквиваленты электрических сетей, вычисляемые по каждой ступени номинального напряжения 35 кВ и выше, по аналогии с методологией расчета сетей 6–20 кВ, или на графики нагрузки, по аналогии с замкнутыми сетями. Для расчета и анализа режимов основных электрических сетей в лаборатории разработана компьютерная программа.

На основе теории планирования эксперимента для замкнутых сетей энергосистем разработана и на конкретном примере опробована

методика построения и анализа математических моделей, отражающих прямую и явную зависимость потерь электроэнергии в сетях от агрегированных контролируемых факторов, существенно влияющих на величину потерь (суммарная электроэнергия, потребляемая всеми нагрузочными узлами, выработка электроэнергии крупными электростанциями системы, перетоки по межсистемным линиям и т. д.).

Тщательный математический анализ зависимости стоимости передачи электроэнергии от основных влияющих факторов позволил трансформировать ее в функцию потерь, а затем получить, исследовать и подтвердить аналитические соотношения для определения экономически обоснованных уровней потерь электрической энергии в отдельных элементах электрических сетей и их произвольной совокупности в режимах максимальных и «средних» нагрузок. Корректность формул подтверждена путем сопоставления результатов расчета экономических потерь, полученных аналитически и графически на примере трансформаторов распределительных сетей 6–20 кВ.

Оптимальные уровни потерь электрической энергии в сетях могут быть обеспечены только в условиях оптимальной загрузки линий и трансформаторов электрических сетей. В процессе исследований были получены аналитические выражения для расчета коэффициентов оптимальных нагрузок трансформаторов 6–330 кВ и проводов воздушных линий 110–220 кВ по трем критериям: минимуму суммарных потерь активной мощности в трансформаторах, минимуму суммарных потерь электроэнергии в трансформаторах, минимуму стоимости трансформации электроэнергии и линейной составляющей стоимости передачи электроэнергии.

Проведенные исследования позволяют определять и анализировать экстремальные значения оптимальных нагрузок линий и трансформаторов, рассматриваемых изолированно вне реальных условий эксплуатации электрических сетей. В то же время представляет несомненный научный и практический интерес исследование нагрузок рассматриваемых элементов электрических сетей при совместной работе линий и трансформаторов в сети. Для этой цели получены соответствующие аналитические соотношения, анализ которых показал, что оптимальная нагрузка электрических сетей в усло-

виях эксплуатации снижается и зависит прежде всего от конструктивного исполнения сети. Чем протяженнее сеть, тем ниже ее оптимальная нагрузка.

На основе результатов теоретических исследований по определению оптимальных уровней потерь разработаны и реализованы концептуальные основы по их достижению в электрических сетях энергосистем. Показано, что для любой электрической сети существует единственная точка, в которой стоимость передачи электроэнергии минимальна, а соответствующее ей значение нагрузочных потерь электроэнергии равно оптимальной величине. При недогрузке сети условно-постоянная составляющая стоимости преобладает над переменной. Движение в сторону оптимума здесь возможно за счет удешевления сети и снижения условно-постоянных потерь. Дополнительных финансовых средств не требуется – любое техническое решение заведомо будет экономически нецелесообразным. Если же фактические значения технических потерь больше оптимальных, то условно-постоянная составляющая стоимости будет меньше переменной. Снижение потерь здесь достигается за счет реализации организационно-технических мероприятий, направленных на повышение пропускной способности сети, как правило, за счет одновременного увеличения стоимости сети и снижения нагрузочных потерь электрической энергии. Таким образом, сопоставление расчетных фактических и оптимальных уровней потерь в сетях позволяет однозначно определить направление движения в сторону оптимума, но, к сожалению, не дает ответа на вопрос – как это делать? Для этой цели на основе теории чувствительности предложены аналитические критерии, позволяющие ранжировать мероприятия по снижению потерь по степени их эффективности и обосновывать стратегию их осуществления на практике на различных иерархических уровнях управления электрическими сетями. Кроме того, разработаны и модифицированы вид и структура целевой функции (приведенных затрат) к дифференцируемому виду, а также методическое и математическое обеспечение для **статической** оптимизации электрических сетей по основным топологическим параметрам. Для этих целей разработана методика, основанная на исследовании матрицы эластичности, вычисляемой

по всем оптимизационным параметрам одновременно. Коэффициенты эластичности позволяют однозначно определить участок сети, оказывающий в данных условиях наиболее сильное влияние на стоимость сети. Участок оптимизируется, и процесс повторяется до получения оптимизированной сети, в которой уровень потерь электроэнергии будет приближен к оптимальному. После внедрения в практику эксплуатации статической оптимизации неизбежен переход к оптимизации электрических сетей с учетом фактора времени. С этой целью были исследованы вопросы **динамической** оптимизации электрических сетей. С использованием элементов комбинаторного анализа, теории множеств и алгебры логики разработаны и реализованы методики составления оптимальных текущих и перспективных планов замены трансформаторов на одностранформаторных подстанциях и проводов воздушных линий.

Исследована экономическая эффективность мероприятий, последовательно реализуемых в течение расчетного срока, и показано, что величину эффекта здесь должно характеризовать суммарное снижение затрат за расчетный период, получаемое на основании сравнения затрат по внедряемой и конкурирующей с ней стратегиям.

Все результаты теоретических исследований реализованы в виде комплексов промышленных компьютерных программ и внедрены в учебно-исследовательском процессе кафедры «Электрические системы» БНТУ и Красноярского технического университета, а также в энергосистемах Республики Беларусь, России, Азербайджана и Эстонии. Программы адаптированы для условий работы в автономном режиме, с современными базами данных и устройствами телемеханики. Разработанное математическое обеспечение постоянно совершенствуется и в настоящее время используется в большинстве электросетевых предприятий Белорусской энергосистемы: в РУПах «Брестэнерго», «Витебскэнерго», «Гомельэнерго», «Гродноэнерго» и «Минскэнерго».

Приглашаем к научно-техническому сотрудничеству.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов М. И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Мн.: Тэхналогія, 2000. – 247 с.